

外部因子に着目したベイズ回帰による長期橋梁振動モニタリング

京都大学大学院 学生員 ○森田 知明 京都大学大学院 正会員 金 哲佑
 京都大学大学院 正会員 大島 義信 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

1. はじめに

橋梁の劣化・老朽化が問題となっている昨今、多くの橋梁をいかに適切に維持管理するかは重要な課題であり、その一助となる技術が橋梁ヘルスマニタリングである。橋梁の損傷・劣化は振動特性の変化として現れるため、従来の関連研究では橋梁の振動特性を同定し、その変化に着目している。しかし、長期の供用期間を有する橋梁において、温度や通行車両などの外部因子の変化は、橋梁振動特性の変化に影響を及ぼす。そこで既往の研究¹⁾では、温度と通行車両の影響を考慮したベイズ回帰による長期橋梁振動モニタリングを検討している。システム観測値と回帰分析による推定値との差(残差)に着目し、残差の信頼区間に収まる割合(Fitting percentage)を用いて、温度と通行車両の影響を検討している。実橋梁の長期モニタリングデータからAR (Auto-regressive) モデルの係数で定義される損傷指標(DI)²⁾を同定し、システム観測値として用いている。一方、振動数は、モニタリング対象の観測振動数選定などに手間がかかるが、構造物の物理特性との関連付けが容易であり、ヘルスマニタリングの観点からは捨て難い観測対象である。本研究は、システム観測値として一般に用いられる振動数に着目し、同様の手法で長期橋梁振動モニタリングを検討する。

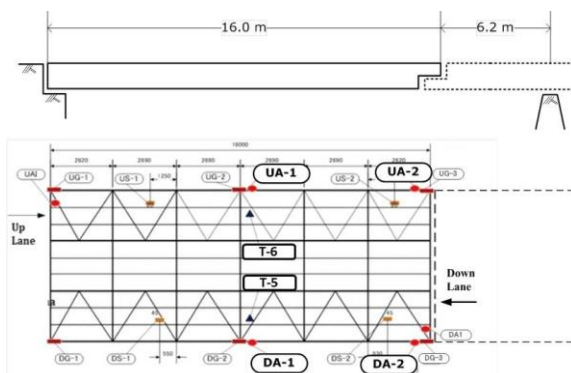


Fig.1 Elevation and plan views with sensor locations on the observation bridge

2. ベイズ回帰による長期橋梁ヘルスマニタリング

システム観測値 (t) と外部因子の値を用いて、ベイズ回帰分析を行う。外部因子を考慮した推定値 ($\hat{t}$) は正規分布で表され、その平均値は式(1)で求まる。

$$\hat{t}_m = \omega^T \Phi(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここに、添字の m は平均値、 T は行列の転置を表す。 ω は推定されたモデルパラメータ、 Φ は基底関数、 $\mathbf{x}$ は外部因子の値で構成される行列を示す。残差 (r) を式(2)のように定義する。

$$r = t_m - \hat{t}_m \quad (2)$$

本研究では、残差の Fitting percentage を用いることにより、回帰精度を評価し、外部因子の影響を検討する。

3. システム観測値

線形ダイナミクスシステムは、式(3)のように AR モデルで表現することができる³⁾。

$$y(k) = \sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + e(k) \quad (3)$$

ここに、 $y(k)$ は離散時間の時刻 k におけるシステムの出力、 $e(k)$ は誤差、 a_i は AR 係数である。本研究では、式(3)より同定される振動数 (f) をシステム観測値とする。

4. 実橋梁の長期モニタリング

観測対象は、橋長 187m、幅員 8m の 7 径間ゲルバー鋼鈑桁橋における上り線の第 1 スパンである。センサ配置を Fig.1 に示す。本研究では、UA-1, UA-2, DA-1, DA-2 で計測した橋梁加速度データ、T-5, T-6 で計測した温度データ、BWIM (Bridge Weigh-in-Motion) システムにより推定した通行車両の重量データを用いる。約 1 年間の観測期間 (2008/8/6~2009/6/21) のうち、水曜日および日曜日の 7 時、13 時、19 時のデータを用いる。なお、全てのデータを健全時のデータとみなす。通行車両特性には周期性があるという BWIM 結果より、時間帯を限定した観測データを用いることで、通行車両の影響を低減できると考える。

キーワード 橋梁振動モニタリング, ベイズ回帰, 長期モニタリング, 温度, 通行車両, 振動数

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 075-383-3421

Table 1 Considering data and factors

	Observed data	Considered factors
Case 1	Non-specified time (7:00, 13:00, & 19:00 on	Temperature & vehicle weight
Case 2	Wednesdays & Sundays)	Temperature
Case 3	Specified time (7:00 on Wednesdays)	Temperature

Table 2 Fitting percentage of residuals on f_4 and f_{10} in cases 1, 2, and 3 at the sensor of UA-1

	f_4	f_{10}
Case 1	94.2%	93.1%
Case 2	91.3%	92.4%
Case 3	93.5%	100%

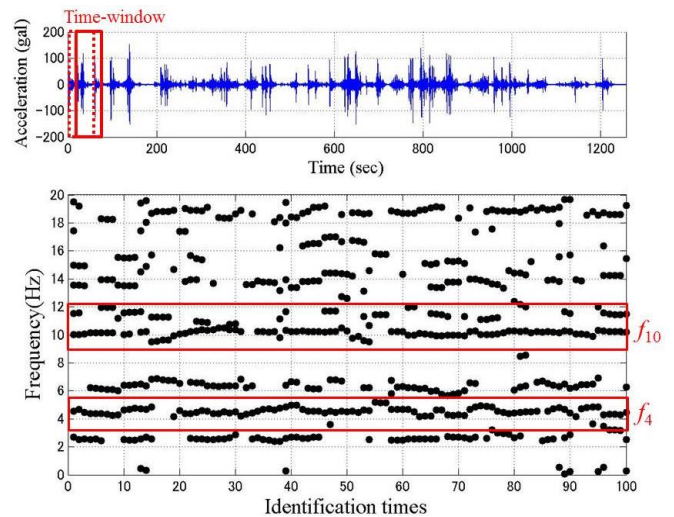
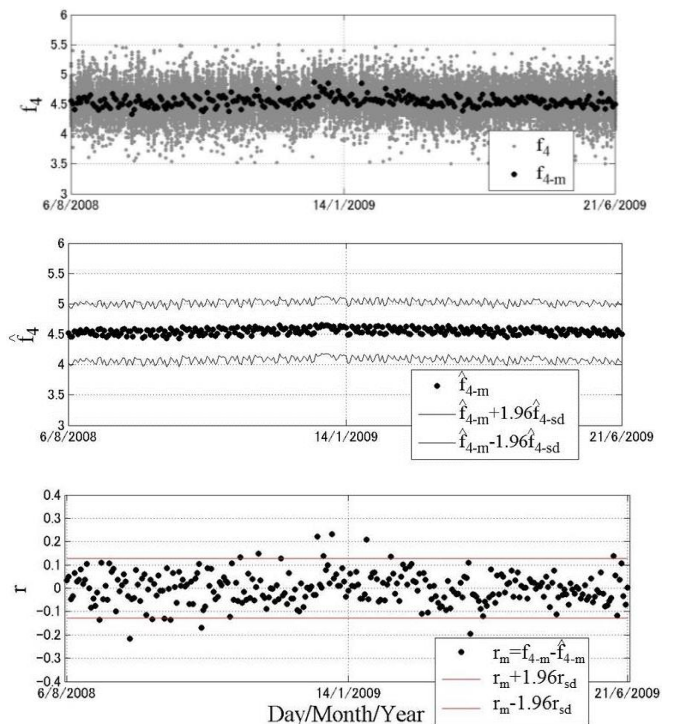
5. 適用結果

同定した観測振動数および同定に用いた橋梁加速度の一例を、**Fig.2** に示す。ここに、タイムウインドウを用いて 100 回同定を行う。本研究では、4Hz 近傍および 10Hz 近傍の振動数 (f_4, f_{10}) に着目する。そして、**Table 1** に示す三つのケースについて、ベイズ回帰分析を行う。観測振動数、推定振動数、残差の一例を、**Fig.3** に示す。ここに、添字の sd は標準偏差を示す。UA-1 における各ケースの f_4 および f_{10} の残差の Fitting percentage (ケース 1 の 95%信頼区間を閾値とする) を、**Table 2** に示す。

Table 2 の f_4, f_{10} のどちらの場合においても、Fitting percentage の値は、「ケース 1>ケース 2」, 「ケース 2<ケース 3」である。つまり、「温度と車両重量を考慮する場合は、温度のみを考慮する場合に比べ回帰精度が高い可能性がある。」「時間帯を限定した場合は、時間帯を限定しない場合に比べ回帰精度が高い可能性がある。よって、時間帯を限定した観測データを用いることで、通行車両の影響を低減できる可能性がある」という結果が得られる。すなわち、既往の研究¹⁾で得られた結果と同じ結果が得られた。したがって、長期橋梁振動モニタリングにおいて、振動数をシステム観測値としても、ベイズ回帰により温度や通行車両の影響を考慮できると考える。

6. 結論

振動数、温度、および通行車両重量に着目したベイズ回帰による長期橋梁振動モニタリング手法を、実橋モニタリングに適用した。検討の結果、ベイズ回帰による長期橋梁振動モニタリング手法は、振動数をシステム観測値とする場合でも有効であると考えられる。

**Fig.2** Bridge acceleration and observed frequencies (UA-1, 7:00 on 6/8/2008, AR order (p) = 100)**Fig.3** Observed and predicted frequencies, and residuals (UA-1, Case 1, f_4)

参考文献

- 1) Kim, C. W., Morita, T., Kitauchi, S. and Sugiura, K.: Considering change of environmental and operational conditions on long-term monitoring of a steel bridge by Bayesian regression, In: *Proc. of 7th Int. Symposium on Steel Structures (ISSS)*, Nov. 7-9, Jeju, Korea, 2013.
- 2) 金 哲佑・北内 壮太郎・杉浦 邦征・川谷 充郎・甲斐 正義：多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法，土木学会論文集 A1, Vol.69, No.3, pp.557-571, 2013.
- 3) 岡林隆敏，奥松俊博，中宮義貴：常時微動に基づく AR モデルによる構造物振動数の高精度自動推定，土木学会論文集，No.759/I-67, pp.271-282, 2004.